

文章编号: 1673-9469(2015)01-0014-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-9469.2015.01.005

河内 - 海防公路软基渗透性及差异沉降研究

卓文泽¹, 周斌²

(1. 广东长大海外工程有限公司, 广东 广州 510075; 2. 江苏省建筑工程质量检测中心有限公司, 江苏 南京 210028)

摘要: 考虑到地基竖向渗透系数改变的问题, 提出了砂井地基平面化等效渗透系数计算方法, 并运用 Plaxis2D 软件进行了对比分析, 并与现场监测数据进行了对比验证, 并系统分析了不同软基处理形式下软基过渡段的差异沉降变化规律。结果表明: 在相同的路堤高差下, 不同的过渡段处理方式产生的工后差异沉降顺序为: 挤密砂桩处理 < 普通砂井处理 < 塑料排板处理, 本工程采用的过渡段软基处理方案满足越南关于工后差异沉降控制标准。

关键词: 河内 - 海防公路; 砂井等效; 差异沉降; 有限元; PLaxis2D

中图分类号: TU416.1

文献标识码: A

Research on equivalent permeability and differential settlement about soft foundation treatment on Hanoi - Hai Phong expressway

ZHUO Wen - ze¹, ZHOU Bin²

(1. Guangdong Grew Up Overseas Engineering Co. Ltd., Guangdong Guangzhou 510075, China;

2. Jiangsu Testing Center For Quality of Construction Engineering Co., Ltd; Jiangsu Nanjing 210028, China)

Abstract: Considering the variation of ground vertical permeability coefficient, the ground plane of sand equivalent permeability coefficient calculation method was presented. The field monitoring data were compared by using the Plaxis2D software. The variation form of settlement of soft base under the transition section of different soft foundation treatment were analyzed. At the same height of embankment the order of differential settlement after different treatment modalities in different transition section is as follow: sand compaction pile treatment, ordinary sand processing and plastic drainage board, increasingly. The results show that the transition section of soft foundation treatment scheme satisfies to the controlling criterion of differential settlements in Vietnam.

Key words: Hanoi - Hai Phong expressway; sand equivalent; differential settlement; finite element; PLaxis2D

现代高速公路的快速施工和软土地基的特殊性产生了许多工程问题, 从我国已投入使用的高速公路来看, 在软土地基路段的突出问题是路堤工后差异沉降大、工后沉降大, 对高速公路的通行与运营带来了极大的危害。邓天棋^[1]讨论了地基软土工程性质、软土层厚度、地基所受荷载、填筑材料、加载速率等因素对沉降的影响; 羊晔^[2]运用 FLAC3D 软件探讨了不同处理方式软土路基过渡段工后沉降及差异沉降特性, 提出了软土路基工后沉降的实用计算方法; 王绪峰^[3]探讨了不同填土高度工况下路桥过渡段纵向和横向地表差异沉降的规律性; J. Han^[4]等利用 Plaxis 有限元程序探讨了桩承加筋路基的工程特性, 并采用 Flac3D 软

件进行数值计算, 对土工格栅刚度、路基填土高度、桩的模量三个主要因素对路基表面与桩顶的最大沉降以及差异沉降的影响进行了研究。目前针对高速公路软土地基过渡段的沉降规律的研究主要集中在路桥过渡段, 对一般过渡段差异沉降的分析并不多。

本文依托河内 - 海防高速公路 EX - 5 标段 (K48 + 000 ~ K63 + 300) 建设工程, 对越南河内 - 海防高速公路不同软基处理方式之间过渡段差异沉降进行研究。为越南后续高等级公路建设中软土路基过渡段的修筑提供可靠的科学依据及工程实践指导。

收稿日期: 2014 - 09 - 28

作者简介: 卓文泽 (1976 -), 男, 广东茂名, 高级工程师, 研究方向为高速公路施工。

1 工程简介

1.1 工程特点

河内 - 海防高速公路为越南全境第一条高等级高速公路, 是该国示范性工程, 工程沿线软土遍布, 如何解决软土地基差异沉降是提高该工程质量的核⼼问题。

该项目 EX - 5 标段由广东长大与广州国际联营体总包, 起止桩号分别为 K48 + 000、K63 + 300, 路基总长度为 15.3 km, 路线主要途径海阳省四圻县与嘉禄县, 标准断面主线路面宽度 33 m, 双向 6 车道, 建设红线宽度 100 m, 合同工期为 33 个月。

由于越南特殊的地质条件和现实经济因素, 对过渡段差异沉降的处治思路与处治费用与国内存在着很大的差别, 国内相关设计规范及经验在越南不能直接被选用, 因此迫切需要对越南高速公路过渡段沉降、差异沉降规律进行系统的研究, 系统的分析不同软基处理方式、堆载高度等因素对差异沉降的影响, 为越南后期高速公路的修建提供科学的施工依据。

1.2 工程地质条件

根据越南 22TCN263—2000、AASHTO 和

表 1 软土的物理力学参数建议值

Tab. 1 Suggested physical and mechanical parameters of soft soil

土层	$R/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	e_0	$I_p/\%$	$C_v/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$	a_v/MPa^{-1}	C_0/kPa	ψ°/\circ
1	18.7	0.799	18	58.0	0.33	32	\
2	18.1	1.075	13	\	0.60	\	22
3A	16.9	1.426	18	11.0	1.36	17.2	\
3B	17.1	1.179	17	17.0	1.01	18.4	\
4	18.5	0.915	17	20.0	0.59	40	\
5	19.2	0.850	20	25.0	0.37	50	\
6	19.6	0.651	11	\	0.22	\	28
7	17.5	0.842	23	18.0	0.55	40	\

表 2 各种软基处理方式的综合比较

Tab. 2 Comprehensive comparison of various modes of soft foundation treatment

软基处理方法	最大处理深度/m	m^2 造价/元	工期	工后沉降值/cm	适用条件
换填	3	60 ~ 150	较短	10 ~ 15	软土较浅的路段
强夯	5 ~ 8	50		10 ~ 20	软土浅且远离建筑物地区
普通砂井	30	360 ~ 500	预压期需 6 ~ 12 个月	15 ~ 20	工后沉降要求低且面积较大的软基
塑料排水板		140 ~ 190			
水泥搅拌桩	15	280 ~ 350	较排水固结法打桩时间	15 ~ 25	不同结构物过渡段
CFG 桩(40 cm)	24	400 ~ 800	长, 预压期短	3 ~ 6	工后沉降小的桥头或路堤过渡段
挤密砂桩(70 cm)	35	600 ~ 900	预压期需 10 个月	5 ~ 10	深厚软土地基, 高填方桥头过渡段

ASTM 标准, 对 EX - 5 标段(KM48 + 000 ~ KM63 + 300) 进行了工程地质勘察, 重点进行了现场十字板剪切试验, 标准贯入试验(SPT), 圆锥触探试验(CPT), 以及室内的土、水样试验, 土样试验结果见表 1。

地质勘察资料显示: 所考察地区原地面以下软土层主要是第 3 层淤泥质土层, 有 3A 及 3B 两个夹层, 其承载力不高, 呈现流塑或软塑状, 压缩性大, 此两层软土是压缩固结的主要对象。第 1 层是黏土层, 中等强度, 第 2 层和第 6 层均为砂层, 砂透水性较好, 有利于地基土层排水固结。

2 过渡段软基处理方法

2.1 软基处理方案的选择

参考国内外对软基处理研究现状, 结合越南能够试作的处理方式, 对各种软基处理方法的处理深度、工程造价、工期、工后沉降参考值及适用范围进行综合分析, 结论如表 2 所示。

根据越南当地地质特征及施工技术条件, 最终 EX - 5 工程采用 4 种软基处理方法: 在该工程线路的桥头过渡段施打挤密砂桩; 主线断面一般路段除个别路基较好, 无需进行地基处理外; 其余均采用排水固结法处理, 即在路堤堆载预压前,

根据不同断面软基工程性质差异,分别打设塑料排水板及砂井,在不同排水处理方式间设置软基处理过渡段。

2.2 过渡段软基处理方案的选择

EX-5 标段软土地基处理方案共分为 4 种不同的过渡形式,分别为无处理方式与塑料排水板之间的过渡、塑料排水板与砂井之间的过渡、砂井与挤密砂桩之间的过渡以及挤密砂桩与桥台之间的过渡。本文研究后 2 种不同地基软基处理方式。

3 砂井渗透系数等效

本文采用 Plaxis 有限元程序结合软基处理平面应变等效方法来研究竖井地基问题,首先将按一定间隔分布的竖井转换为沿着路堤纵向连续的砂墙,完成从三维到二维模型的转换,然后在路堤横向或纵向截取单位厚度作为分析对象。

迄今为止,国内外学者对竖井地基平面应变等效计算方法提出了很多理论,本文基于赵维炳^[5]考虑土体双向变形、双向渗流的观点,在刘加才^[6]竖井地基平面应变等效计算方法的基础上,进一步考虑地基竖向渗透系数的改变。

陈小丹^[7]在赵维炳不考虑砂井阻力求得的地基平面应变等效计算方法的基础上,深入研究砂井阻力及涂抹效应对砂井地基的影响;chai^[8]从竖井宏观作用出发,考虑地基任意时刻总体平均固结度相等的基础上推导竖井地基平面应变等效公式。本文结合陈小丹和 chai 的等效公式,进一步考虑地基竖向渗透系数的改变推导得出下述公式:

$$K_{hp} = \frac{8(B - B_w)^2}{3d_e^2 F_a} k_h \quad (1)$$

$$K_{vp} = D_z \cdot k_{ve} \quad (2)$$

$$k_{ve} = \left(1 + \frac{2.5l_s^2 k_h}{\mu D_e^2 k_v} \right) k_v \quad (3)$$

式中: k_{hp} 、 k_{vp} 分别表示分析采用的径向和竖向渗透系数; k_h 、 k_v 、 k_{ve} 分别为地基处理前径向和竖向渗透系数及等效地基竖向渗透系数; k_s 涂抹区土体径向渗透系数; D_z 为竖向系数的调整值; n_p 为井径比; s_p 为涂抹比; l_s 为竖井有效排水深度; B_w 为砂墙厚度; d_e 为砂井有效排水直径。

基于上述推导公式,对竖井地基平面应变分析中的渗透系数进行等效,并采用 Plaxis2D 有限

元软件,结合河内-海防高速公路 EX-5 标段现场实测沉降数据,进一步论证该法的合理性。

4 模型的建立及计算方法的验证

越南河内-海防高速公路 K52+200 断面采用 100 mm × 4.5 mm 塑料排水板地基处理方式,间距 1.8 m,正方形布置,处理深度 13.5 m,等载预压,预压期 6 个月。路堤设计填 3.4 m,边坡坡率 1:1.37,路基底宽 19 m。

4.1 模型建立

条形荷载作用下,根据软基沉降变形规律,利用轴对称性取路基一半区域建立有限元模型,地基水平方向取路堤底宽的 2 倍。根据设计及施工情况,在地表以上 0.5 m 砂垫层处、1.5 m 路堤及 2.5 m 路堤处各铺设一层土工格栅,使用 Geo-grids 组件进行模拟,轴向刚度设为 200 kN/m,考虑土工格栅与土体间的强度折减作用,在两侧设置接触面单元。分阶段模拟分层填筑、堆载施工,材料模型选取摩尔-库伦模型,砂桩与土体不设置接触面单元。

根据本文提出的砂井问题平面化的有限元求解方法进行简化,增大砂井地基的渗透系数,并将路基各土层分为左右两部分,路基左侧采用等效后的渗透系数,而路基右侧采用原土层渗透系数,从而进一步模拟路堤实际情况,得到更为准确的有限元数值模拟结果。

4.2 沉降计算结果及分析

由总位移矢量图图 1 可以发现,靠近路堤中心线的地方,沉降位移较大,偏离路基轴线的地方沉降越来越小;在路堤中心轴线处,地基位移主要以垂直位移为主,在路堤边缘处,地基主要以水平位移为主,在两者之间,位移方向逐渐由垂直向水平方向过渡,在远离路堤处,存在较小的斜向上的位移。

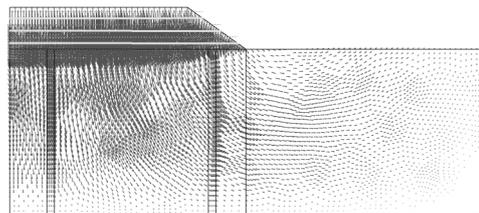


图1 K52+200总位移矢量图

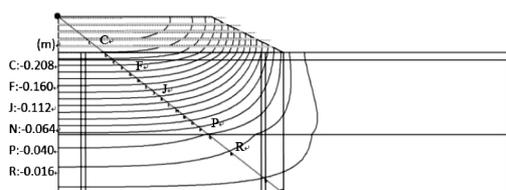
Fig.1 The total displacement vector graph of K52+200

5 典型过渡段断面差异沉降特性研究

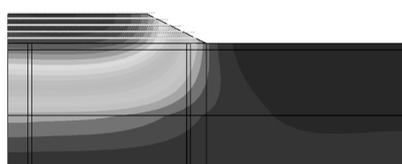
5.1 塑料排水板与砂井处理过渡段差异沉降研究

越南河内 - 海防高速公路 K51 + 690 - K51 + 710 为塑料排水板与普通砂井软基处理方式间的过渡段。本文选取断面 K51 + 690 与断面 K51 + 710 为研究对象, 通过两断面间的差异沉降来分析普通砂井与塑料排水板两种不同软基处理方式间的差异沉降特性, 具体分为 2 种工况, 两个断面软土深度均为 19 m, 工况 5 断面 K51 + 690 堆载高度为 4.8 m, 软基处理采用普通沙井; 工况 6 断面 K51 + 710 堆载高度为 4.5 m, 软基处理采用塑料排水板。

根据砂井问题平面化计算理论, 对工况 5 采用的 2.5 m × 19 m 普通砂井地基与工况 6 采用的 2.5 m × 19 m 塑料排水板处理的地基进行简化。K51 + 690 断面软土层厚 19 m, 有 3 个典型的软土层, 分别为 1 号淤泥混砂层、3B 淤泥质土层及 4 号软粘土层; 断面 K51 + 690 堆载过程中, 先堆一层 0.8 m 的砂垫层, 其后每增加 1 m, 铺设一层土工布, K51 + 690 总堆载高度为 4.8 m, 地基水平计算范围取路堤底宽的 2 倍, 本断面取 60 m, 坡率为 1:2。



(a) 工况5



(b) 工况6

图2 最终位移等值线图

Fig.2 The final displacement

利用有限元程序对工况 5、工况 6 分别进行计算, 计算结果如图 2 所示, 由图可知, 路基垂直位移由路堤中心向路堤两侧递减, 在远离路堤的地方, 地表沉降近乎为零, 路堤堆载对路基垂直方向上的影响较大, 由路堤到路基可以清晰的发现, 地基土位移逐渐减小。

从图 2(b) 中可以明显得发现, 路堤中心处的沉降最大, 软基第 1 层从路堤中心到坡脚沉降都较大, 在坡脚垂直方向, 可以清晰的发现, 地基发生了水平向的位移, 从坡脚到基底, 水平位移渐渐减小, 基底位置水平位移近乎为零。

通过数值模拟软件计算得知, 工况 5 堆载断面最终沉降为 206 mm, 工后沉降量为 41.6 mm。工况 6 加载完成最终沉降量为 190.3 mm, 工后沉降量为 45.2 mm。

工况 5 与工况 6 对比分析可知, 相同的路堤高差下, 采用普通砂井处理的过渡段比采用塑料排水板处理的过渡段产生的工后差异沉降小, 差异沉降满足越南规范提出的差异沉降控制标准 2 cm, 过渡方式较合理。

5.2 砂井与挤密砂桩处理过渡段差异沉降特性

EX - 5 标段 K53 + 900 ~ K54 + 040 段是不同软基处理方式挤密砂桩与砂井间的过渡段, 其交界面为 K54 + 010, 取距离砂井与挤密砂桩交界面 10 m 处为研究对象, 断面 K54 + 000 软基处理方式为砂井, K54 + 020 软基处理方式为挤密砂桩。

本文选取这两个断面为典型断面, 通过分析这两个断面间的差异沉降来研究普通砂井与挤密砂桩两种不同软基处理方式间的差异沉降特性, 具体分为 2 种工况, 两个断面软土深度均为 31 m, 工况 7 断面 K54 + 000 堆载高度为 5.1 m, 软基处理采用普通沙井; 工况 8 断面 K54 + 020 堆载高度为 5.5 m, 软基处理采用挤密砂桩。

工况 7 路基软土层厚 31 m, 分 4 个软土层, 工程性质特别差, 采用 1.5 m × 31 m 普通砂井处理, 根据本文砂井问题平面化有限元理论进行简化计算。路堤加载过程中, 按照实际施工情况, 分别在路堤堆载高度为 1、2.5、4m 处铺设 3 层加筋土工布, 数值模拟中, 用 Geo - grids 组件模拟, 参数取值同上, 路基水平计算范围取路堤底宽的 2 倍, 本断面取 54 m, 坡率为 1:2。

工况 8 采用挤密砂桩软基处理方式, 间距 1.5 m。将该段砂桩等效为横向与纵向的砂墙, 运用平面有限元求解方法对该复合地基进行处理和研究, 砂桩弹性模量为 100 MPa, 桩墙覆盖土体面积为 1.05 m², 桩间距 1.5 m, 等效桩墙模量 40 MPa, 泊松比为 0.2。在堆载过程中, 由于荷载的作用, 桩、土间出现相对滑动的概率较大, 考虑到桩、土间作用强度的折减, 在建模过程中, 用

Plate 组件模拟砂桩,在桩与土接触面处设置接触面单元来解决强度折减问题。

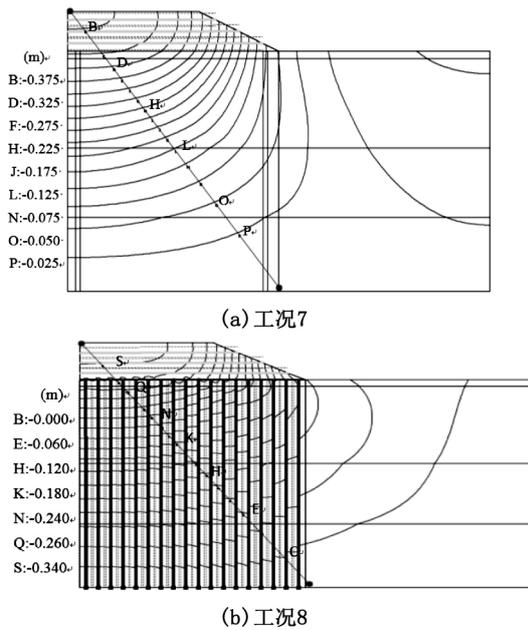


图3 位移等值线图

Fig. 3 The graph of displacement

结合本文提出的等效渗透系数计算方法,利用有限元程序分别对工况7、工况8进行运算,计算结果如图3所示。图3(a)为工况7结束等待期8个月后的最终垂直位移等值线图,由图可知,路堤中心沉降最大,坡脚处的位移较小,近乎为零;路堤表面边缘处的垂直位移与路堤下第2层中心处的垂直位移相近,由图中的标识线可知,相同的沉降量差值,其等值线间的间距由路基底层向路基表面逐渐减小,工况7最终最大垂直位移为464.6 mm。

图3(b)为工况8最终位移等值线图,研究发现,在同一条等值线上,桩土间的等值线位置要低于无砂桩处理部分的路基,而且由路堤中心向路堤边缘,这种现象越来越明显,表明桩间土的位移要大于桩及路堤边缘地基的位移。

表3 工况7~工况8计算结果

Tab. 3 The calculation results of condition7~8

工况	预压8个月/mm	最终沉降/mm	工后沉降/mm
7	381	464.6	83.6
8	280.8	351	70.2

工况7-工况8计算结果见表3,实际工程中采用工况7与工况8进行过渡,产生的差异沉降相对较小,满足本文提出的工后差异沉降控制标准,过渡方式较合理,若本过渡段只采用普通砂井处理方式,则不能满足工后沉降控制标准。

6 结论

1) 实例验证本文提出的砂井地基平面化等效渗透系数理论为合理、可行的。

2) 相同的路堤高差下,采用普通砂井处理的过渡段比采用塑料排板的过渡段产生的工后差异沉降小,采用挤密砂桩处理的过渡段比采用普通砂井处理的过渡段产生的工后差异沉降小。

参考文献:

- [1]邓天棋. 彭湖高速路桥过渡段不均匀沉降分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2010.
- [2]羊晔. 高速公路软土地基差异沉降规律与土工格栅处理方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [3]王绪锋. 路桥过渡段差异沉降特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [4]JIE HAN, KEN AKINS. Use of geogrid-reinforced and pile-supported earth structures [C]//Proceeding of international deep foundation congress, ASCE, Orlando, 2002: 668-679.
- [5]赵维炳, 陈永辉, 龚友平. 平面应变有限元分析中砂井的处理方法[J]. 水利学报, 1998(6): 53-57.
- [6]刘加才, 施建勇, 赵维炳. 真空堆载联合预压作用下路基固结分析[J]. 水运工程, 2003(6): 1-4.
- [7]陈小丹, 赵维炳. 考虑井阻和涂抹的砂井地基平面应变等效方法分析[J]. 岩土力, 2005, 26(4): 567-571.
- [8]CHAI J C, SHEN S L, MIURA N, et al. Simple method of modeling PVD-improved subsoil[J]. Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 965-972.

(责任编辑 王利君)